

所属类别	2020 年“华数杯”全国大学生数学建模竞赛	参赛编号

低温防护服御寒仿真模拟

摘要

低温防护服可以避免在极寒气温下的冻伤，对于极地科考人员有着非常重要的防护作用。本文对于低温防护服进行优化设计进行研究，对防护服的传热过程建立非稳态一维传热模型，综合考虑了传热方式、初始条件、边界条件以及防护服中间层的自发热等，并对防护服的厚度、经济等进行优化设计。

对于问题一，为确定温度在低温防护服各层的分布情况，我们需要分析热量在人体—低温防护服—低温环境的流动过程，建立非稳态一维传热方程组求解。根据牛顿冷却定律和傅立叶定律确定热传导方程及初始条件和边界条件。利用 MATLAB 对中间层复合材料的放热能力数据进行拟合，得到放热能力函数曲线。对于连续变量厚度和时间构成的二维区域进行离散化处理，采用有限差分法来逐层求解偏微分方程组，利用边界条件对离散后的节点进行递推求解。

对于问题二，在第一问所建立的动态传热模型的基础上，外部环境的风速影响，主要影响外层的隔热效果，所以相对应的热对流系数不再是定值，根据附件二中的对流换热系数计算公式，带入问题一的模型求解，并适当改变换热系数观察温度分布。

对于问题三，问题三是建立在问题一传热模型基础上的参数优化。目的是求解第 I 层的最优厚度，且制造的成本不得超过原有的 50%。需要综合考虑研发制作成本、衣服笨重程度、人体承受重量等因素，建立多目标优化模型。将第一层的厚度最小化作为优化的目标，以实验者的皮肤温度大于等于 15°C 以及根据人体承受的重量随时间的变化和资金的最小值作为约束条件，对模型进行进一步扩展研究，求解满足条件的作业服最优厚度。

对于问题四，问题四是在问题三的基础上，不追加资金，提高复合材料的放热能力，想要达到比第三问的最大时间还要多的时间，可以建立复合材料的放热能力函数与时间的比例关系方程，用遗传算法优化得到最优放热比例系数 k 。

关键词：动态一维传热模型;差分法;优化模型；遗传算法

1 问题重述

1.1 问题背景

低温防护服可以避免一些特定的极寒条件下的作业人员冻伤、而带变相材料的低温防护服的中间层在一定条件下可以释放热量，延缓体感温度降低的时间，延长超低温作业人员的作业时间。为了验证该种变相材料防护服的耐低温效果，故需要先做仿真模拟。提供的中国实验者前往南极洲长城站在 -40°C 的低温下进行工作，需要根据实验者的皮肤表皮温度，建立低温防护服的非稳态传热模型，并应用模型求解实验者在无风、有风下的最大安全工作时长，以及如何在资金允许范围下优化设计防护服厚度，使得实验者工作时长尽量长。该问题具有如下特征以及要求：

(1) 防护服分为四层，其中 I、II、III 层分别为隔热层（最外层）、功能层（中间层）、织物层（内层），IV 层为织物层与皮肤层之间的空气间隙，第 I 层直接与外部环境接触。中间层由混合材料组成，可以释放热量，提供材料释放能力表。

(2) 测试时假设人体温度为 37°C 。

(3) 中间层厚度太大会导致衣物硬度过高，人无法工作。后期优化衣服厚度只增加最外层厚度，或者提高功能层产热能力。

(4) 应建立动态热量传递数学模型，进行预测最大安全工作时长。

1.2 求解问题

本文根据问题描述，建立数学模型，解决以下问题：

问题一：

假设实验者站在环境安静、无风的南极长城站，气温 -40°C 。建立人体—低温防护服—低温环境的一维非稳态传热模型，根据附件一中的低温材料放热能力，估计传热模型中的参数，计算人体表面温度变化曲线，并预测实验者能够在室外站多久？

问题二：

与问题一的环境不同，实验者站在风速 3m/s 的 -40°C 环境下做轻微运动。传热模型参数发生改变，重新计算人体表面温度变化曲线，并预测实验者能够在室外活动多久？

问题三：

在问题一的环境下，实验者静止不动，但是考虑防护服很重，人体承受能力会随时间下降。根据人体承受重量的变化函数和承受的重量随时间的变化，求出一个变化函数，而理想化的时间即为总时间。由于低温还会对实验者的体温造成影响，改变的服装厚度会对防护服与空气流速的对流导热系数产生影响，且增厚的服装材料资金需要小于 50%，此模型的时间应小于理想化的总时间。则如何优化防护服的外层厚度？

问题四：

与问题三的不同之处在于，不追加资金，如何提高中间层的放热能力，使实验者在外的作业时间不比第三问的少？

2 问题分析

低温防护服的设计，是考虑多种传热方式以及中间层材料放热能力，对作业服建立一维非稳态传热模型，从而求解温度分布、预测实验者的最大安全时间范围以及防护服参数优化问题。该仿真预测的核心在于传热模型的建立以及应用。

2.1 问题一分析

问题一已经给定了各层材料的厚度以及导热系数等参数，并且给出了中间层的放热能力信息。要预测实验者能够在所属环境中的最大安全时间，需要建立人体-低温防护服-低温环境的一维非稳态传热模型。对于模型中防护服与环境的热对流系数，通过最小二乘法进行估计，应用到该模型当中，将人体皮肤表面的温度分布计算出来，再根据人体的最小承受温度 15°C ，将最大安全时间计算出来。

2.2 问题二分析

问题二实际上是对于问题一的优化，当环境风速发生改变，人体做轻微运动时，防护服的最外层与空气的热对流系数是随着空气流速和温度而发生改变的，不再是一个定值。根据附件二中的对流换热系数计算公式，带入问题一的模型求解，并适当改变其值观察温度分布。

2.3 问题三分析

问题三是建立在问题一传热模型基础上的参数优化。目的是求解第 I 层的最优厚度，且制造的成本不得超过原有的 50%。需要综合考虑研发制作成本、衣服笨重程度、人体承受重量等因素，建立多目标优化模型。将第一层的厚度最小化作为优化的目标，以实验者的皮肤温度大于等于 15°C 以及根据人体承受的重量随时间的变化和资金的最小值作为约束条件，对模型进行进一步扩展研究，求解满足条件的作业服最优厚度。

2.4 问题四分析

问题四是在问题三的基础上，不追加资金，提高复合材料的放热能力，想要达到比第三问的最大时间还要多的时间，可以建立复合材料的放热能力函数与时间的比例关系方程，确立优化的适应度函数，采用遗传算法进行求解。

3 模型假设

假设 1：热传递沿垂直于皮肤的方向进行，因此可视为一维的。

假设 2：防护服各导热系数各向同性。

假设 3：各接触面边界条件连续，无接触热阻

假设 4：最外层为环境温度影响，最内层为人表面温度影响，与相应边界存在对流换热。

假设 5：温度是连续变化的，但是温度是可以跳跃的。

4 符号说明

表 1: 符号说明

变量	说明	量纲
$k_j, (j=1,2,3,4)$	导热系数	$W/(m \cdot ^\circ C)$
$\rho_j, (j=1,2,3,4)$	材料密度	kg/m^3
$C_j, (j=1,2,3,4)$	比热容	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
h_c	第一层与外界对流换热系数	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
h_p	第四层与人体对流换热系数	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
$l_j, (j=1,2,3,4)$	材料厚度	mm
T_∞	温度	$^\circ C$
T_{ren}	人体温度($37^\circ C$)	$^\circ C$

5 模型准备

5.1 背景知识

5.1.1 热力学三大定律

(1) 热力学第一定律：一个热力学系统的内能增量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功的和。

(2) 热力学第一定律：热量可以自发地从温度高的物体传递到较冷的物体，但不可能自发地从温度低的物体传递到温度高的物体。

(3) 热力学第一定律：绝对零度时，所有纯物质的完美晶体的熵值为零。

5.1.2 常见的热力学问题

热力学问题可以分成 3 类：

(1) 强化传热。即在一定的条件(如一定的温差、体积、重量或泵功等)下增加所传递的热量。

(2) 削弱传热,或称热绝缘。即在一定的温差下使热量的传递减到最小。

(3) 温度控制。为使一些设备能安全经济地运行,或者为得到优质产品,要对热量传递过程中物体关键部位的温度进行控制。本文要解决的问题就属于这一类。

5.1.3 常见的传热方式

传热方式也分为 3 种基本放热方式^[1]。

(1) 热传导 (thermal conduction): 物体各部分之间不发生相对位移时, 依靠分子, 原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能传递, 规律总结为傅里叶定律。

(2) 热对流(heat convection): 指由于流体的宏观运动的引起的流体各部分之间发生相对位移, 冷、热流体相互掺混所导致的热量传递过程, 规律总结为牛顿冷却公式。

(3) 辐射传热(radiative heat transfer): 物体通过电磁波来传递能量的方式。

5.1.4 边界条件

热力学问题的常见边界条件也有三类, 设 $T(x, y, z)$ 为物体的三维温度分布函数, Γ 为物体的三维边界曲面。

(1) 第一类边界条件: 表达了在边界情况的温度;

$$T(x, y, z)|_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z) \quad (1)$$

(2) 第二类边界条件: 表达了在边界情况的热流密度;

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z) \quad (2)$$

(3) 第三类边界条件: 表达了在边界情况下物体与周围流体见得对流传热系数和周围流体的温度。

$$\left. \left(\frac{\partial T}{\partial n} + \sigma T \right) \right|_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z) \quad (3)$$

5.1.5 傅里叶传热定律

傅里叶传热定律: 在导热过程中, 单位时间内通过给定截面的导热量, 正比于垂直该截面方向上的温度变化率和截面面积, 而热量传递的方向则与温度升高的方向相反。用热流密度 q 表示时有下面这个公式

$$q = -k \nabla T \quad (4)$$

式中: q 代表沿 x 方向传递的热流密度; $\nabla T = \frac{dT}{dx}$ 即表示物体沿 x 方向的温度变化率。

当物体温度是三维空间下的函数时, 三个坐标方向上的单位矢量和该方向上的热流密度分量的乘积合成一个空间热流密度矢量, 记为 \vec{q} 。傅里叶导热定律的一般形式如下:

$$\vec{q} = -k \text{grad} T = -k \nabla T \vec{n} \quad (5)$$

式中: $\text{grad} T$ 是空间某点的温度梯度(temperature gradient); \vec{n} 是通过该点的等温线上的法向单位矢量, 指向温度升高的方向。

5.1.6 斯忒藩-玻耳兹曼定律

斯忒藩-玻耳兹曼（Stefan-Boltzmann）定律是为了定量的表达单位黑体表面在一定温度下向外辐射能量的多少。

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

式中： σ 为黑体辐射常数，其大小为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； C_0 为黑体辐射系数，其大小为 $5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，下角标 b 表示黑体。

5.2 模型建立

本文将防护服和人体三维模型简化为一维模型，从厚度方向上进行研究。假设该模型温度分布边界条件连续，热传导只在厚度 x 上进行，即垂直于皮肤表面研究。该过程考虑防护服表面对外界环境的对流传热，超低温提条件忽略热辐射，内部空气流动少，内部空气与人之间也为对流传热，建立模型如下图所示。

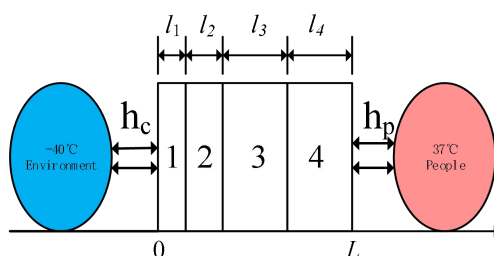


图 1 一维传热模型

5.3 各层材料传热方式分析

传热方式分为热传导、热辐射和热对流。每层材料特性不同，所处环境不同，因此每层材料的传热方式和边界条件都不相同，需要进行分析。

（1）第一层材料

第一层材料传热内部主要是热传导，且其外边界 $x=0$ 处会和环境进行对流传热，属于第三类传热过程。

（2）第二层材料

第二层材料传热方式主要是热传导。而且当温度在 14.05°C 到 26.018°C 会产热。

（3）第三层材料

由于内部空气较少，且空气流速慢，因此第三层材料传热方式主要是热传导。

（4）第四层材料

第四层材料内部传热方式为热传导，且其余人体接触面传热方式为热对流，属于第三类边界条件。

6 问题一：传热动态模型

6.1 给定问题分析

问题一要求对无风环境下防护服、人、空气之间的传热进行动态建模。附件二给出了每层防护服材料的厚度、密度、比热容、导热系数，基于上述条件和能量守恒定律建立热传递的偏微分方程，并且确定偏微分方程的初始值和边界条件。目前还未给定的参数有空气热特性参数，包括密度、比热容和导热系数，还有防护服表面和空气之间的对流散热系数 h_c ，人表面皮肤和防护服内部空气之间的导热系数 h_p 。其中，空气的热特性参数可以网上找到，人表面皮肤和防护服内部空气之间的导热系数 h_p 可为常数，主要分析防护服表面和空气之间的对流散热系数 h_c 与防护服功能层产热能力的影响。以此得到后续最优的外层厚度设计。

6.2 动态传热模型建立

6.2.1 模型建立

根据能量守恒定律可以得到非稳态传热偏微分方程：

$$\rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_v + q_{diss} \quad (j=1,2,3,4) \quad (7)$$

式中，左项表示传热过程中热力学能的变化，右边第一项表示物体内部热传导，第二项 q_v 表示为物体产热，第三项表示散热， $i=1,2,3,4$ 分别代表 4 个区域。

其中只有区域 2 在 14.05°C 到 26.018°C 之间会产热，其余区域 q_v 为零。区域 1 和区域 4 在 $x=0$ 和 $x=L$ 处会和外界进行热量交互，这两边界处 q_{diss} 不为零。

6.2.2 模型初始值及边界条件

6.2.2.1 模型初始值及外边界条件

假设环境温度 -40°C 不变，人体温度 37°C 不变，当人进入南极的时候人和防护服都已经到达稳态，即人、内部空气、防护服初始温度都为 37°C。

$$\begin{cases} -k_1 \nabla T = h_r (T_\infty - T(t, 0)) \\ -k_4 \nabla T = h_p (T(t, L) - T_{ren}) \\ T_j(0, x) = T_{ren} \quad (j=1,2,3,4) \end{cases} \quad (8)$$

式中， k_1 代表防护服最外层的导热系数， k_4 代表内部空气的导热系数， h_r 和 h_p 分别为防护服表面和环境之间的对流散热系数和内部空气和人之间的对流散热系数。 T_∞ 和 T_{ren} 分别代表环境温度和人的温度。

6.2.2.2 模型内部边界条件

该传热模型一共有三个接触面，分别为 1 区和 2 区之间，2 区和 3 区之间，3 区和 4 区之间，如图 2 所示。假设各材料的接触良好，无接触热阻情况，满足接触面边界条件连续，即：

$$\begin{cases} T(t, l_i^+) = T(t, l_i^-) \\ k_i \nabla T(t, l_i^-) = k_{i+1} \nabla T(t, l_i^+) \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

式中，i 代表三个接触面。

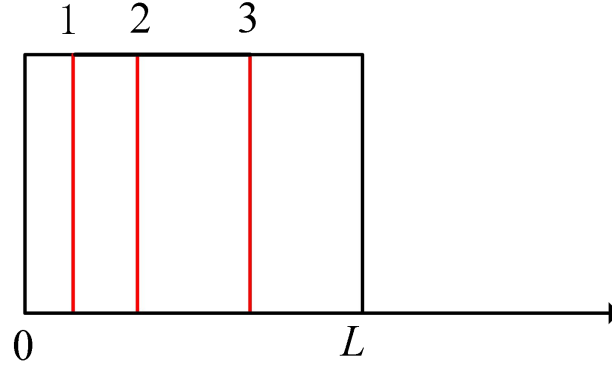


图 2：各层接触面

6.2.3 模型汇总

综合上述模型分析，模型汇总如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{传热平衡方程: } \rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_v + q_{diss} \quad (j=1,2,3,4) \\ \text{边界条件设置: } \begin{cases} -k_1 \nabla T = h_c (T_\infty - T(t, 0)) \\ -k_4 \nabla T = h_p (T(t, L) - T_{ren}) \\ T(t, l_i^+) = T(t, l_i^-) \\ k_i \nabla T(t, l_i^-) = k_{i+1} \nabla T(t, l_i^+) \end{cases} \quad (i=1,2,3) \\ \text{初始条件设置: } T_j(0, x) = T_{ren} \quad (j=1,2,3,4) \end{array} \right. \quad (10)$$

6.3 模型求解

6.3.1 模型求解方法—有限差分法

式 (11) 中的偏微分方程相互耦合，求解复杂，本文参考文献^[2]选择有限差分法将偏微分方程转化为常微分方程。代入传热模型就是将一维传热模型的空间 x 和时间 t 离散化，从而将偏微分方程转化为差分方程格式，求得其温度分布的数值解。

具体求解域网格划分方法：记求解域为 Ω ，则 $\Omega = \{(t, x) | (0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T)\}$ 。

(1) 空间尺度上，将区间 l_i 分为 M_i 份， $M_i = \frac{l_i}{\Delta l_i}$ ，其中 Δl_i 为空间步长。i=1,2,3,4，

分别代表 4 个区域。

(2) 时间尺度上，将时间 T 分为 n 份， $n = \frac{T}{\Delta t}$ ， Δt 为时间步长。

(3) 用平行线将 Ω 划分为矩形网格，如下图所示。

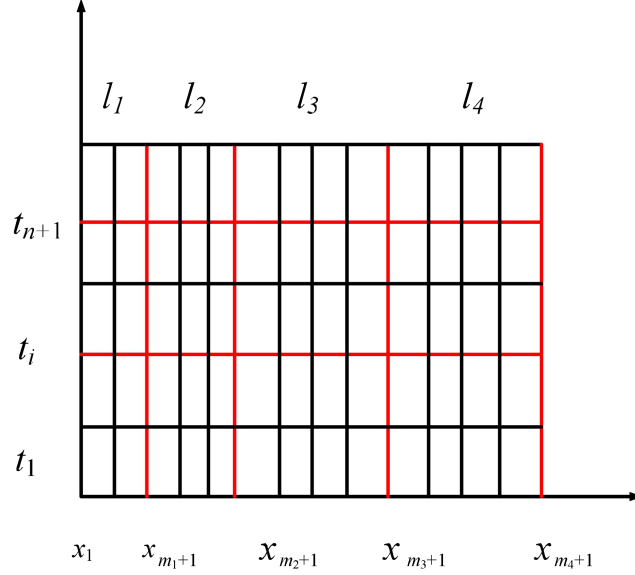


图 3 求解域网格划分

由于该模型网格划分后数据较多，计算量大。若选取隐式差分格式，虽然求解更稳定，但是必须联立方程组，导致求解复杂化，因此本文选择显示差分格式，并给出其稳定限定条件。显示差分格式的特点是求解当前时间层的温度 T_i^{n+1} 时需要依赖上一时刻 T_i^n 的温度信息。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{传热平衡方程: } \Delta x_j \rho_j c_j \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k_j \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x_j} + q_v^n + q_{diss}^n \quad (i=1,2,3,4) \\ \text{外边界条件: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \Delta x_1 \rho_1 c_1 \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = -h_c (T_1^n - T_\infty) - k_1 \frac{T_1^n - T_2^n}{\Delta x_1} \\ \frac{1}{2} \Delta x_4 \rho_4 c_4 \frac{T_{end}^{n+1} - T_{end}^n}{\Delta t} = -h_p (T_{end}^n - T_{ren}) - k_4 \frac{T_{end-1}^n - T_{end}^n}{\Delta x_4} \end{array} \right. \\ \text{内边界条件: } \frac{1}{2} (\Delta x_j \rho_j c_j + \Delta x_{j+1} \rho_{j+1} c_{j+1}) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k_j \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\Delta x_j} + k_{j+1} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_{j+1}} \end{array} \right. \quad (11)$$

为避免显示差分格式求解出现不稳定，不收敛的情况，需考虑其稳定限制条件^[3]。

$$\begin{cases} Fo_{\Delta} = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} & (\text{傅里叶网格数}) \\ Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2} & (\text{内节点限制条件}) \\ Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2(1 + \frac{h \Delta x}{\lambda})} & (\text{边界限制条件}) \end{cases} \quad (12)$$

6.3.2 求解步骤

将求解域进行网格划分以后,就可以对每个时间步长和空间步长下温度分布进行求解。假定防护服表面和外部环境对流散热系数 h_c 为变量,人表面与内部空气之间对流散热系数 h_p 为已知量,探究当防护服产热能力固定,不同 h_c 的时候,人体温度到达 15°C 的时间。具体步骤如下:

STEP1: 根据附件二的数据和 excel 表格将产热能力 mw/mg 转化为热通量 w/m^2 ,并 matlab 进行最小二乘拟合。

STEP2: 假定人与内部空气之间对流散热系数 h_p 为 $8\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$,当 h_c 为无风情况下材料中给定的 $3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时,人体表面温度随时间变化情况。

STEP3: 当 h_c 的散热能力小于功能层材料的产热能力时,更新 h_c 的值,找到散热和当前产热能力相当的时候 h_c 的值,即临界的 h_c 。

STEP4: 重复上述步骤。探究当 h_c 的值过大、过小和临界的时候,防护服和人体表面温度分布,并保存在文件中。

6.4 结果与分析

按照上述步骤进行求解,将功能层产热能力转化为通量并进行拟合得到图 4。该图代表功能层在 14.05°C 到 26.018°C 之间的产热能力。 $R\text{-square}$ 代表拟合的好坏,值越接近 1 说明拟合程度越好。

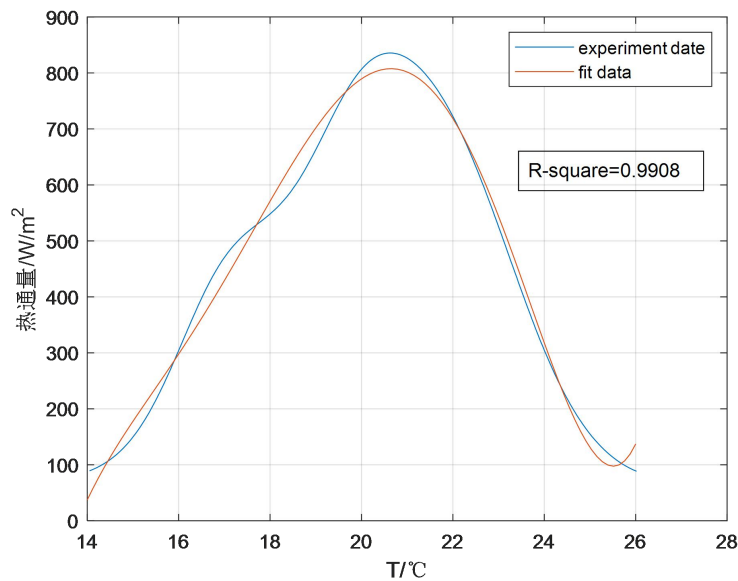


图 4 实验数据与拟合数据

将功能层的产热能力与 $h_c=3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $h_p=8\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 带入动态传热模型进行求解。得到皮肤表面的温度随时间分布图：

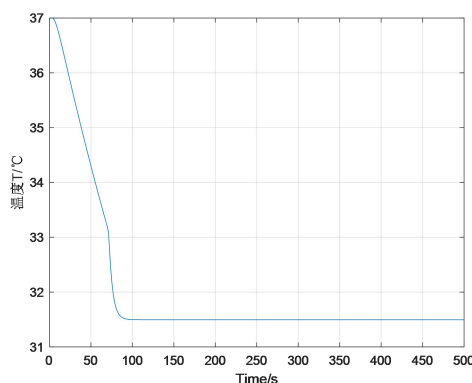


图 5 人表面皮肤的温度分布

在当前产热能力与散热能力条件下，温度不会降到 15 度以下，皮肤表面温度会在 31.5 度左右，而温度变化趋势发生改变是功能层产热影响。这说明当前功能层产热能力大于与环境的散热能力。此时实验者能在室外一直坚持。本文参考清华大学一篇博士论文^[4]中一些常见的平均散热系数，使用最小二乘法在[0 200]之间找到临界的 h_c ，即此时功能层的产热能力和散热能力相当。

表 2 常见对流散热系数参考

散热设计方式	平均散热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
自然对流	5-25
强制对流	15-250
液体冷却，水冷	300-1000
液体冷却，油冷	100-700
铝肋片+风冷散热	80-90
热管散热（理论值）	100-500

当 $h_c=52.039\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时，此时人表面的温度分布呈现明显的三段式下降，第一段：功能层温度大于 26 度，没有产热。在当前较大的对流散热条件下，温度骤降，此时 dT/dt 很大。第二段，功能层温度在 14.05°C 到 26.018°C 之间以上图所示的产热能力开始产热，温度缓慢下降，此时 dT/dt 极小，说明当前散热条件和功能层产热能力相当。第三段：当温度小于 14.05°C，功能层固化完毕不再放热，此时人表面温度又开始急剧下降， dT/dt 很大，最终稳定在 9.15°C 左右。而实验者到达 15°C 的时间为 558s，约 9.3min。因此将 $h_c=52.039\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 定为临界对流散热系数。

图 7 给出了温度随时间和空间温度分布图，可以看到在时间尺度上，温度各层温度分布都在降低，最终趋于稳定，空间尺度上，温度呈现明显的梯度变化，从内到外，各层温度在依次降低。

图 8 给出了对流散热系数在临界值以上人表面温度分布，随着对流散热系数增大，人表面温度到达 15°C 的时间逐渐缩短，但是到达稳态时的温度基本不变。

具体数据在 T_tx.mat 文件中。

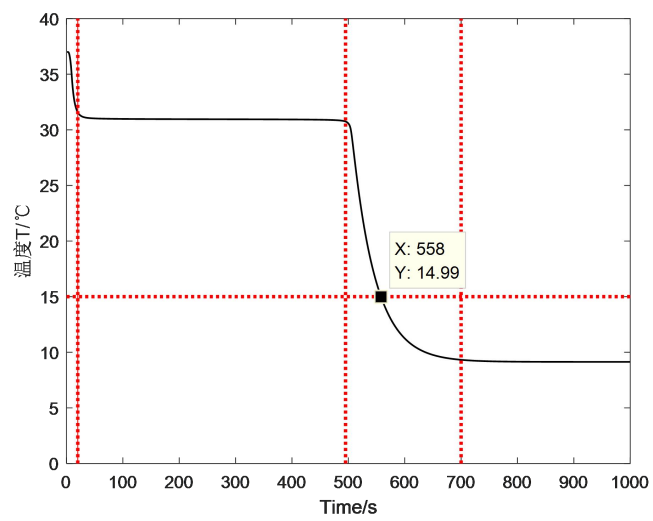


图 6 当 $h_c = 52.039 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时，人表面温度分布

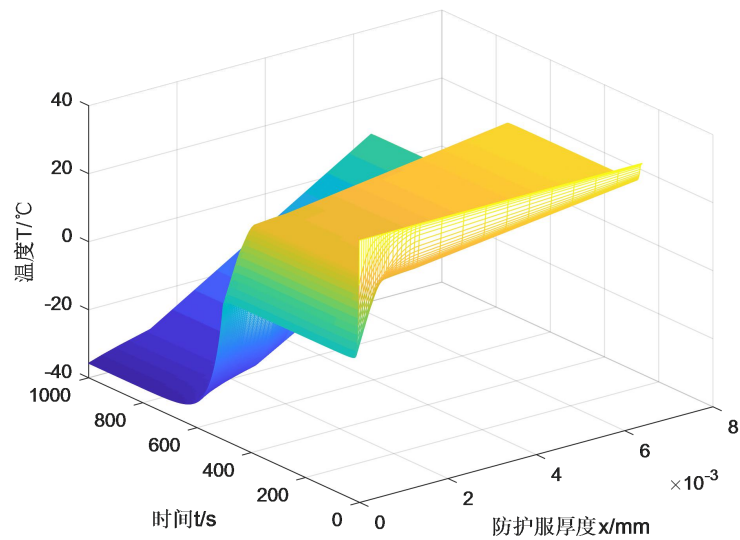


图 7 温度随时间空间分布图

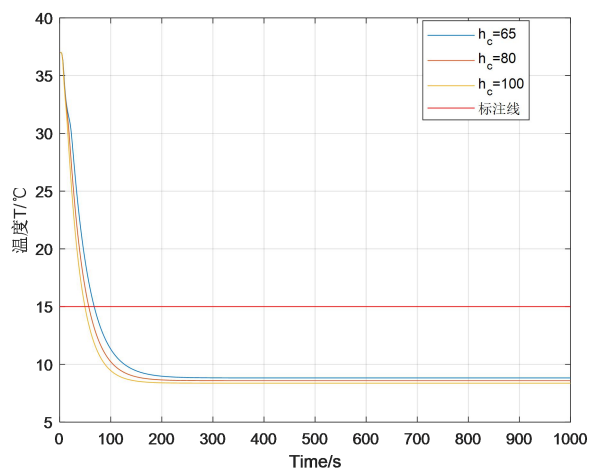


图 8 h_c 在临界值以上人表面温度

6.5 模型扩展 —— 一维到三维

上述的一维模型是按照人体和衣服是长方体假设进行的，通过阅读文献发现有将人体和衣服等效为圆柱体的。因此本文进行模型扩展，按照材料中给定的人体有效表面积和人身高体重，算出圆柱体最内层半径。然后按照三层衣服的厚度以及内部空气的厚度进行在有限元分析软件 **comsol** 中建模，以得到更加直观的传热温度立体分布图。并做出如下假设：

- (1) 最外层传热方式为对流传热， h_c ，最内层也为对流传热， h_p 。
- (2) 三维模型的最上层和最下层由于相较于表面积较薄，不考虑其散热。
- (3) 假设防护服各层材料各向同性

但是不幸的是，有限元分析软件求解通过划分网格求解，人的身高 1.7m 和衣服厚度 0.0007mm 数量级相差太大，划分网格时数量巨大，导致需要很大的内存。下图是人的身高 1.7m 视角缩小 100 倍后网格划分图。直到交稿期间也没跑出来，模型附在附件中。

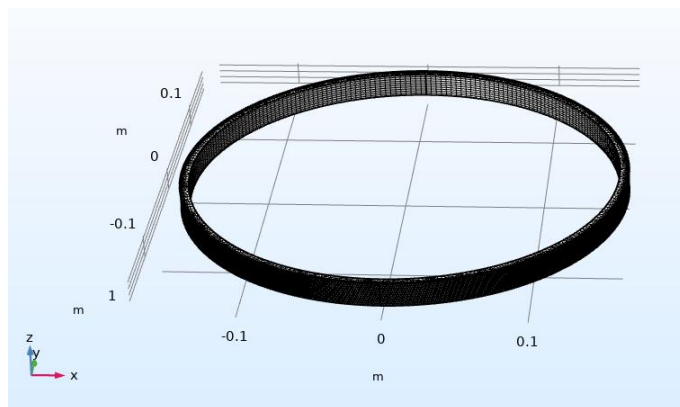


图 9 三维图形网格划分图

7 问题二 单变量变化求解问题

7.1 给定问题分析

问题二主要是研究该动态传热模型中的风速增加和人做轻微运动 h_c 的变化情况问题。防护服表面与环境之间的对流散热系数 h_c 受到多个因素影响，如图 9 所示。图中显示了对流散热系数 h_c 受到多个因素影响，影响所占比重未知，且 h_c 是动态变化的。在此条件下本文使用平均对流散热系数，通过上述约束条件求出 h_c 的变化范围，研究平均对流散热系数 h_c 在该范围内变化时防护服和人体表面温度分布情况。

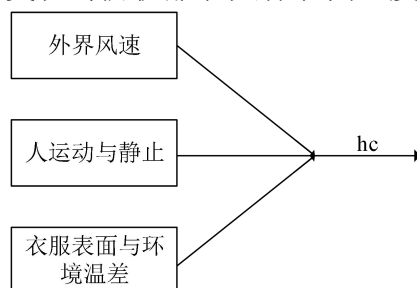


图 10 对流散热系数 h_c 的影响因素

7.2 模型建立

忽略人做轻微运动时产热，模型主要求解 $T(h_c)$ ，即 h_c 变化时 T 的温度分布。

7.2.1 模型约束条件

式 (13) 给出了三个约束条件下 h_c 的取值范围，三者取并集得出 h_c 在 $4W/(m^2 K)$

以上，结合问题一求出来的临界对流散热系数，将 h_c 取值在 $[4\ 52.039]$ 之间时该模型的温度分布。

$$\begin{cases} \text{风速影响: } h_c \uparrow \\ \text{人运动与静止: } h_c = 4W/(m^2 K) \\ \text{温差: } (h_c)_{\max} = 2.38 * (-40 - 37)^{0.25} = 7.0502W/(m^2 K) \end{cases} \quad (13)$$

7.2.2 模型汇总

综上所述，建立 h_c 变化时，该模型温度分布。

$$\begin{cases} \text{风速影响: } h_c \uparrow \\ \text{人运动与静止: } h_c = 4W/(m^2 K) \\ \text{温差: } (h_c)_{\max} = 2.38 * (-40 - 37)^{0.25} = 7.0502W/(m^2 K) \\ \text{传热平衡方程: } \rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_v + q_{diss} (j=1, 2, 3, 4) \\ \text{边界条件设置: } \begin{cases} -k_1 \nabla T = h_c (T_\infty - T(t, 0)) \\ -k_4 \nabla T = h_p (T(t, L) - T_{ren}) \\ T(t, l_i^+) = T(t, l_i^-) \\ k_i \nabla T(t, l_i^-) = k_{i+1} \nabla T(t, l_i^+) \end{cases} (i=1, 2, 3) \\ \text{初始条件设置: } T_j(0, x) = T_{ren} (j=1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (14)$$

7.3 结果与分析

从图 11 可以看出，当对流传热系数在 $[4, 52]$ 之间变化时，此时对流传热系数小于临界值，因此防护服产热能力大于外界散热。对流传热系数在这个区间增大时，影响的最终到达稳态的时间，对最终稳态值几乎没有影响。当 h_c 等于 52 时，此时散热能力和功能层产热能力相当，温度缓慢下降，不会稳定在稳态值，逐渐下降至产热最小温度 14°C 。

图 12 给出了对流传热系数在 $[4, 52]$ 之间变化时第一层接触面温度，当对流传热系数增大时，第一层接触面温度的稳态值在逐渐降低，且收敛速度越来越快。这是外层散热

和中间功能层产热公共作用的结果。其余接触面就不一一列举了，具体数据在 `mat` 文件中。

此时人体表面温度大于 15 摄氏度，不用考虑温度影响，而当 h_c 大于临界值时，实验者返回时间见问题一。

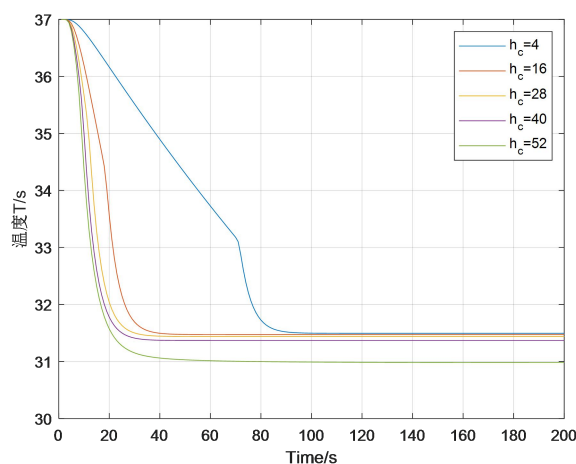


图 11 对流传热系数在[4,52]之间变化时人体表面温度

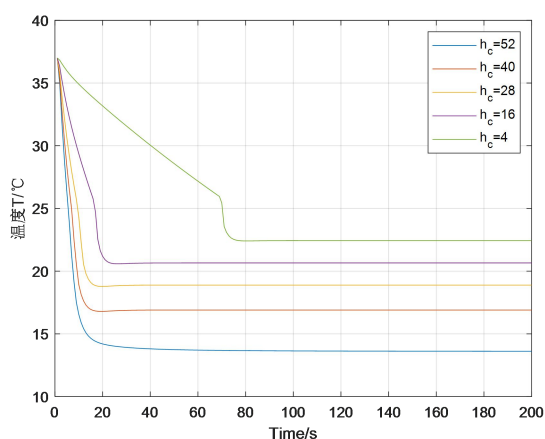


图 12 传热系数在[4,52]之间变化时第一层接触面温度

8 问题三 多目标优化求解问题

8.1 给定问题分析

问题三是研究防护服厚度对实验者表面温度达到 15 摄氏度的时间影响，同时需要考虑防护服笨重不利于工作、资金增加 50%以内、最大承受重量随着时间延长而减小、只能增加最外层厚度且每次只能增加 0.3mm 的约束条件。扩展模型以对防护服的设计做出参考。

8.2 模型建立

8.2.1 模型约束条件

(1) 厚度约束。中间层厚度最大厚度 0.45mm，因为太厚，衣物硬度就大，人根本就无法工作。只能增加最外围厚度且每次只能增加 0.3mm。

(2) 资金约束。预算资金在原来基础上增加 50% 以内。

(3) 最大重量约束。虽然厚度增加人坚持时间延长，但是人在外工作最大承受重量减少。

假设第一层厚度为 l_1 ，第一层增加后厚度为 l ，则 $T(x, t, h_c, l_1)$ 。将上述条件变为数学形式为：

$$\begin{cases} \text{厚度约束: } \frac{l}{l_1} = N, N = 1, 2, 3, \dots \\ \text{资金约束: } \frac{l}{l_1} \leq 4 \\ \text{最大重量约束: } \left[\frac{t|_{T(x, t, h_c, l) = 15^\circ\text{C}}}{10} \right] * 0.5 \leq 100 \end{cases} \quad (15)$$

8.2.2 模型汇总

综上所述，建立多目标约束时该模型温度分布。

优化目标: $\min(l)$

$$\begin{cases} \text{厚度约束: } \frac{l}{l_1} = N, N = 1, 2, 3, \dots \\ \text{资金约束: } \frac{l}{l_1} \leq 4 \\ \text{最大重量约束: } \left[\frac{t|_{T(x, t, h_c, l) = 15^\circ\text{C}}}{10} \right] * 0.5 \leq 100 \\ \text{传热平衡方程: } \rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_v + q_{diss} (j = 1, 2, 3, 4) \\ \text{边界条件设置: } \begin{cases} -k_1 \nabla T = h_c (T_\infty - T(t, 0)) \\ -k_4 \nabla T = h_p (T(t, L) - T_{ren}) \\ T(t, l_i^+) = T(t, l_i^-) \\ k_i \nabla T(t, l_i^-) = k_{i+1} \nabla T(t, l_i^+) \end{cases} (i = 1, 2, 3) \\ \text{初始条件设置: } T_j(0, x) = T_{ren} (j = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (16)$$

8.3 结果与分析

如果采用问题一中的对流散热系数时，会发现人体表面温度会稳定在 15°C 以上，因此此章节中选用更大的对流散热系数，研究厚度变化时温度分布。图 13 显示了对流散热系数为临界值时厚度变化，温度分布情况，发现只增加一层厚度即可满足需求。

又将 h_c 增大至 $200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，如图 14 所示，当增加了最外层 3 层厚度时温度不会下降至 15°C 以下。此时防护服重量远小于最大承受重量，资金也在预算之内，防护服最外层厚度应增加至原来的 4 倍。

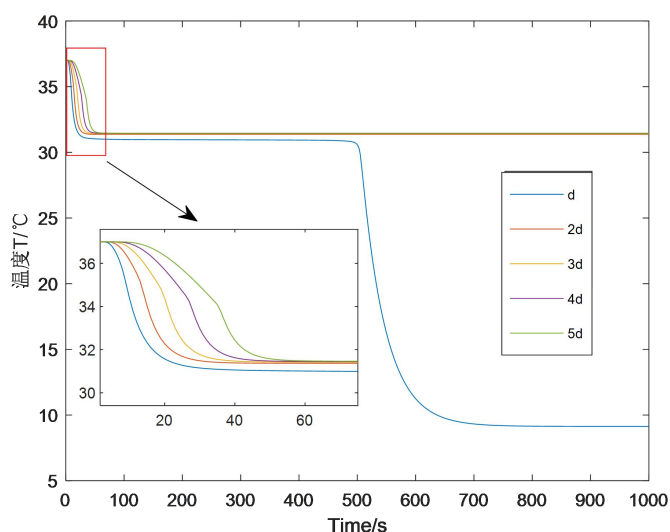


图 13 对流传热系数 h_c 为 $52.039\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，厚度增加时，人体表面温度

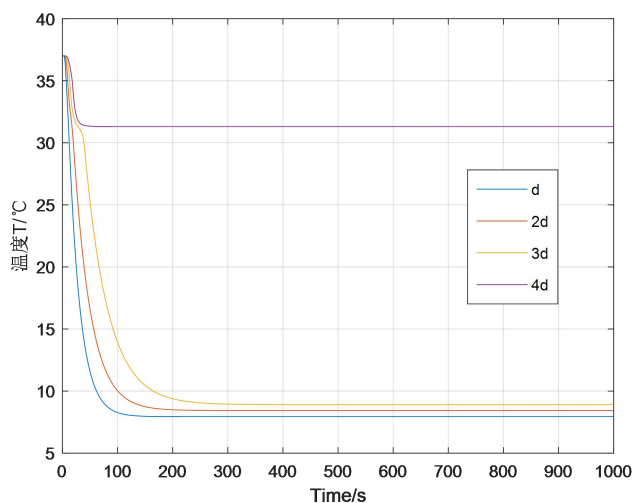


图 14 对流传热系数 h_c 为 $200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，厚度增加时，人体表面温度

9 问题四 单目标优化求解问题

9.1 给定问题分析

该问题是要求出当厚度不变，等比例增加放热能力时，实验者在室外坚持的时间不比增加厚度少。与第三问的区别是一个从增加厚度角度来优化防护服的性能，一个从增加功能层放热能力角度来增加放热能力。通过对放热能力的计算对防护服功能层的材料选取提供参考。

9.2 模型建立

假设原来材料的放热能力为 Q ，提高后的放热能力为 kQ ，采用第三问中第一层厚度增加 3 倍时的坚持时间 92s。采用遗传算法 **ga** 求解出放热能力增加因子 k 。

9.2.1 模型优化目标

第四问中遗传算法的优化目标可表示为：

$$\min(|t|_{T(x,t,h_c,k)=15^\circ\text{C}} - 92|) \quad (17)$$

式 (18) 当 k 变化时，温度到达 15°C 时的时间 t 和第三问中的时间最接近。

9.2.2 模型汇总

综上所述，建立 k 值改变时候该模型温度分布，采用遗传算法进行求解。

$$\begin{aligned} &\text{优化目标: } \min(|t|_{T(x,t,h_c,k)=15^\circ\text{C}} - 92|) \\ &\left\{ \begin{array}{l} \text{传热平衡方程: } \rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_v + q_{diss} (j=1,2,3,4) \\ \text{边界条件设置: } \begin{cases} -k_1 \nabla T = h_c (T_\infty - T(t,0)) \\ -k_4 \nabla T = h_p (T(t,L) - T_{ren}) \\ T(t, l_i^+) = T(t, l_i^-) \\ k_i \nabla T(t, l_i^-) = k_{i+1} \nabla T(t, l_i^+) \end{cases} (i=1,2,3) \\ \text{初始条件设置: } T_j(0,x) = T_{ren} (j=1,2,3,4) \end{array} \right. \quad (18) \end{aligned}$$

9.3 结果与分析

经过遗传算法长时间反复迭代，最终求得 $k=4$ 时，此时工作人员在外坚持时间和第三问一样。即当散热能力为原来的 4 倍时，可以为第三问的坚持时间。

参考文献

- [1] 杨世铭, . 传热学[M] . 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [2] 陈文斌, 程晋, 吴新明, 等. 微分方程数值解[Z]. 上海: 复旦大学出版社, 2017
- [3] 石仁刚, 高理平. Maxwell 方程的一种显式时间高精度有限差分方法[J]. 中国科学: 数学, 2019 (8): 1139-1158.
- [4] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 清华大学, 2016.

附录

编程软件: matlab

问题 1 程序

程序编号	T1	文件名称	SkinT.m	说明	传热模型离散求解
<pre> function [T] = skinT(ah1,ah2) global Ttable Wtable %skinT 已知 h1,h2 求皮肤表面的温度 % ah1 是外界与衣服最外层的对流传热系数 % ah2 是空气层与皮肤的对流传热系数 % T 是皮肤表面温度 rho=[300,552.3,208,1.18]; %4 层材料温度，其中空气取的是 1.18.常温下应该是 1.29 c=[5463.2,2400,4803.8,1005];%4 层材料的比热容 lam=[0.0527,0.06,0.068,0.028];%4 层材料的导热系数 x=[0.0003,0.0004,0.0007,0.0005]; %每层的厚度，空气厚度是 5mm dx=[0.00005,0.00005,0.0001,0.0005]; %求解时每个空间的空间步长 dt=0.002; %时间步长 Tout=-40+273.15; Tin=37+273.15; %最外面空气和最里面人初始温度，而且这里单位是摄氏度。题目中 条件给的是开尔文 LEN1=int8(x(1)/dx(1))+1; %记录每段接触点的位置，也可以说是求解个数，这里 x 已 已经是 dx 整数倍，因此不用化为整形 LEN2=LEN1+x(2)/dx(2); LEN3=LEN2+x(3)/dx(3); LEN4=LEN3+x(4)/dx(4); Q=0;%初始放热能力，单位 W/m^2 T=zeros(7200/dt,LEN4);%先看下 2 小时内模型温度分布 T(1,:)=37+273.15; %第 0 秒设置所有点的温度是 37, h1=ah1;h2=ah2; %设置对流交换系数。由于换热系数是个变量。因此设为自变量 %h1 是一个变量，随着人运动和外部环境、服装表面的温度差决定 for n=1:7200/dt-1 %前两个小时温度随 t 和 x 的分布 unknow=(h1*(Tout-T(n,1))-lam(1)*(T(n,1)-T(n,2))/dx(1))*dt/(0.5*dx(1)*rho(1)*c(1))+T(n,1); %第一层得考虑对流换热系数 T(n+1,1)=unknow; for i=2:LEN1 if i>=2&&i<=LEN1-1 unknow=lam(1)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(1)*dt/(dx(1)*rho(1)*c(1))+T(n,i); T(n+1,i)=unknow; elseif i==LEN1 unknow=(lam(2)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(2)+lam(1)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(1))*... </pre>					

```

            dt/(0.5*(dx(1)*rho(1)*c(1)+dx(2)*rho(2)*c(2)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
        end
    end
    for i=LEN1+1:LEN2
        if i>=LEN1+1&&i<=LEN2-1

unknown=(Q+lam(2)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(2))*dt/(dx(2)*rho(2)*c(2))+T(n,i);
%这里加一个中间层产热，单位 w/m^2 ,Q 是热通量
            T(n+1,i)=unknown;
            a=unknown-273.15;

Q=(0.09892*a^5-9.365*a^4+348.6*a^3-6395*a^2+5.803e4*a-2.091e5)*(a>(14.05+273)&
&a<(26.018)); %T 和 a    可以维持 10min
            elseif i==LEN2

unknown=(lam(3)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(3)+lam(2)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(2))*...
            dt/(0.5*(dx(2)*rho(2)*c(2)+dx(3)*rho(3)*c(3)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
        end
    end
    for i=LEN2+1:LEN3
        if i>=LEN2+1&&i<=LEN3-1

unknown=lam(3)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(3)*dt/(dx(3)*rho(3)*c(3))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
            elseif i==LEN3

unknown=(lam(4)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(4)+lam(3)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(3))*...
            dt/(0.5*(dx(3)*rho(3)*c(3)+dx(4)*rho(4)*c(4)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
        end
    end
    for i=LEN3+1:LEN4
        if i>=LEN3+1&&i<=LEN4-1

unknown=lam(4)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(4)*dt/(dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
            elseif i==LEN4

unknown=(lam(4)*(T(n,LEN4-1)-T(n,LEN4))/dx(4)-h2*(T(n,LEN4)-Tin))*...
            dt/(0.5*dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,LEN4);
            T(n+1,i)=unknown;
        end
    end
end

```

```

    end
end

aa=xlsread('附件 1 放热能力数据.xlsx','A2:B358')
aa1=aa(:,1);
aa2=aa(:,2)*-456.52;

x=[0.0003,0.0004,0.0007,0.005]; %每层的厚度，空气厚度是 5mm
dx=[0.00005,0.00005,0.0001,0.0005]; %求解时每个空间的空间步长
x1=dx(1):dx(1):x(1);
x2=x(1)+dx(2):dx(2):x(1)+x(2);
x3=x(1)+x(2)+dx(3):dx(3):x(1)+x(2)+x(3);
x4=x(1)+x(2)+x(3)+dx(4):dx(4):x(1)+x(2)+x(3)+x(4);
x=[0,x1,x2,x3,x4];

aaa=skinT(52.039,8)-273.15;
T=aaa(1:500:7200/0.002,end);
plot(t(1:100),T(1:100))
plot(t(1:1000),T(1:1000))
%找到 T=15 的时 t 的值，ga 优化 k 值，k 变化时，T 等于 15 的时间等于和已知量 t 相比最小。求解时间
bb1=min(abs(aaa(:,end)-15))
aa1=find((aaa(:,32)==bb1+15));
aaa(aa1(1),32)
plot([20 20],[0 40],'r')
plot([495 495],[0 40],'r')
plot([700 700],[0 40],'r')
plot([0 1000],[15 15],'r')

aaa1=skinT1(65,8)-273.15;
T=aaa1(1:500:3600/0.002,end);
plot(t(1:1000)',T(1:1000))

T=aaa(1:500:7200/0.002,1:end);
mesh(x,t(1:1000),T(1:1000,:))
set(gca,'Ylim',[0:100:1000])

load T_W.mat
plot(Ttable,Wtable)
p = polyfit(Ttable,Wtable,6);
x1 = linspace(14,26);
y1 = polyval(p,x1);

```

```
hold on
plot(x1,y1)
grid on
box on
```

问题 2 程序

程序编号	T2	文件名称	SkinT.m	说明	传热模型离散求解
见程序 1 后处理部分					

问题 3 程序

程序编号	T3	文件名称	SkinT1.m	说明	传热模型离散求解
<pre>function [T] = skinT(ah1,ah2) global Ttable Wtable %skinT 已知 h1,h2 求皮肤表面的温度 % ah1 是外界与衣服最外层的对流传热系数 % ah2 是空气层与皮肤的对流传热系数 % T 是皮肤表面温度 rho=[300,552.3,208,1.18]; %4 层材料温度，其中空气取的是 1.18.常温下应该是 1.29 c=[5463.2,2400,4803.8,1005]; %4 层材料的比热容 lam=[0.0527,0.06,0.068,0.028]; %4 层材料的导热系数 x=[0.0003*4,0.0004,0.0007,0.005]; %每层的厚度，空气厚度是 5mm dx=[0.00005,0.00005,0.0001,0.0005]; %求解时每个空间的空间步长 dt=0.002; %时间步长 Tout=-40+273.15; Tin=37+273.15; %最外面空气和最里面人初始温度，而且这里单位是摄氏度。题目中 条件给的是开尔文 LEN1=int8(x(1)/dx(1))+1; %记录每段接触点的位置，也可以说是求解个数，这里 x 已 经是 dx 整数倍，因此不用化为整形 LEN2=LEN1+x(2)/dx(2); LEN3=LEN2+x(3)/dx(3); LEN4=LEN3+x(4)/dx(4); Q=0;%初始放热能力，单位 W/m^2 T=zeros(3600/dt,LEN4);%先看下 2 小时内模型温度分布 T(1,:)=37+273.15; %第 0 秒设置所有点的温度是 37, h1=ah1;h2=ah2; %设置对流交换系数。由于换热系数是个变量。因此设为自变量 %h1 是一个变量，随着人运动和外部环境、服装表面的温度差决定 for n=1:3600/dt-1 %前两个小时温度随 t 和 x 的分布 unknow=(h1*(Tout-T(n,1))-lam(1)*(T(n,1)-T(n,2))/dx(1))*dt/(0.5*dx(1)*rho(1)*c(1))+T(</pre>					

```

n,1); %第一层得考虑对流换热系数
    T(n+1,1)=unknown;
    for i=2:LEN1
        if i>=2&&i<=LEN1-1

unknown=(lam(1)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(1)*dt/(dx(1)*rho(1)*c(1))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
        elseif i==LEN1

unknown=(lam(2)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(2)+lam(1)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(1))*...
            dt/(0.5*(dx(1)*rho(1)*c(1)+dx(2)*rho(2)*c(2)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
    for i=LEN1+1:LEN2
        if i>=LEN1+1&&i<=LEN2-1

unknown=(Q+lam(2)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(2))*dt/(dx(2)*rho(2)*c(2))+T(n,i);
%这里少一个中间层产热，单位 w/m^2 ,Q 是热通量
            T(n+1,i)=unknown;
            a=unknown-273.15;

Q=(0.09892*a^5-9.365*a^4+348.6*a^3-6395*a^2+5.803e4*a-2.091e5)*(a>(14.05)&&a<(
26.018))*1; %T 和 a    可以维持 10min
        elseif i==LEN2

unknown=(lam(3)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(3)+lam(2)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(2))*...
            dt/(0.5*(dx(2)*rho(2)*c(2)+dx(3)*rho(3)*c(3)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
    for i=LEN2+1:LEN3
        if i>=LEN2+1&&i<=LEN3-1

unknown=lam(3)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(3)*dt/(dx(3)*rho(3)*c(3))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
        elseif i==LEN3

unknown=(lam(4)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(4)+lam(3)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(3))*...
            dt/(0.5*(dx(3)*rho(3)*c(3)+dx(4)*rho(4)*c(4)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
    for i=LEN3+1:LEN4

```



```

        if i>=LEN3+1&&i<=LEN4-1

unknown=lam(4)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(4)*dt/(dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,i);
        T(n+1,i)=unknown;
        elseif i==LEN4

unknown=(lam(4)*(T(n,LEN4-1)-T(n,LEN4))/dx(4)-h2*(T(n,LEN4)-Tin))*...
        dt/(0.5*dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,LEN4);
        T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
end

后处理部分与程序 1 相同

```

问题 4 程序

程序编号	T4	文件名称	ga_fit.m ga_fitmyexample.m	说明	传热模型 离散求解
<pre> function y = ga_fit(K) global Ttable Wtable %skinT 已知 h1,h2 求皮肤表面的温度 % ah1 是外界与衣服最外层的对流传热系数 % ah2 是空气层与皮肤的对流传热系数 % T 是皮肤表面温度 rho=[300,552.3,208,1.18]; %4 层材料温度，其中空气取的是 1.18.常温下应该是 1.29 c=[5463.2,2400,4803.8,1005];%4 层材料的比热容 lam=[0.0527,0.06,0.068,0.028];%4 层材料的导热系数 x=[0.0003,0.0004,0.0007,0.005]; %每层的厚度，空气厚度是 5mm dx=[0.00005,0.00005,0.0001,0.0005]; %求解时每个空间的空间步长 dt=0.002; %时间步长 Tout=-40+273.15; Tin=37+273.15; %最外面空气和最里面人初始温度，而且这里单位是摄氏度。题目中 条件给的是开尔文 LEN1=int8(x(1)/dx(1))+1; %记录每段接触点的位置，也可以说是求解个数，这里 x 已 已经是 dx 整数倍，因此不用化为整形 LEN2=LEN1+x(2)/dx(2); LEN3=LEN2+x(3)/dx(3); LEN4=LEN3+x(4)/dx(4); Q=0;%初始放热能力，单位 W/m^2 T=zeros(7200/dt,LEN4);%先看下 2 小时内模型温度分布 T(1,:)=37+273.15; %第 0 秒设置所有点的温度是 37, h1=200;h2=8; %设置对流交换系数。由于换热系数是个变量。因此设为自变量 %h1 是一个变量，随着人运动和外部环境、服装表面的温度差决定 </pre>					

```

for n=1:7200/dt-1 %前两个小时温度随 t 和 x 的分布

unknown=(h1*(Tout-T(n,1))-lam(1)*(T(n,1)-T(n,2))/dx(1))*dt/(0.5*dx(1)*rho(1)*c(1))+T(
n,1); %第一层得考虑对流换热系数
    T(n+1,1)=unknown;
    for i=2:LEN1
        if i>=2&&i<=LEN1-1

unknown=lam(1)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(1)*dt/(dx(1)*rho(1)*c(1))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
            elseif i==LEN1

unknown=(lam(2)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(2)+lam(1)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(1))*...
                dt/(0.5*(dx(1)*rho(1)*c(1)+dx(2)*rho(2)*c(2)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
    for i=LEN1+1:LEN2
        if i>=LEN1+1&&i<=LEN2-1

unknown=(Q+lam(2)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(2))*dt/(dx(2)*rho(2)*c(2))+T(n,i);
%这里加一个中间层产热，单位 w/m^2 ,Q 是热通量
            T(n+1,i)=unknown;
            a=unknown-273.15;%转化为摄氏度

Q=(0.09892*a^5-9.365*a^4+348.6*a^3-6395*a^2+5.803e4*a-2.091e5)*(a>(14.05)&&a<(
26.018))*1; %T 和 a 可以维持 10min
            Q=Q*K;
            elseif i==LEN2

unknown=(lam(3)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(3)+lam(2)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(2))*...
                dt/(0.5*(dx(2)*rho(2)*c(2)+dx(3)*rho(3)*c(3)))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;

        end
    end
    for i=LEN2+1:LEN3
        if i>=LEN2+1&&i<=LEN3-1

unknown=lam(3)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(3)*dt/(dx(3)*rho(3)*c(3))+T(n,i);
            T(n+1,i)=unknown;
            elseif i==LEN3

unknown=(lam(4)*(T(n,i+1)-T(n,i))/dx(4)+lam(3)*(T(n,i-1)-T(n,i))/dx(3))*...
                dt/(0.5*(dx(3)*rho(3)*c(3)+dx(4)*rho(4)*c(4)))+T(n,i);

```

```

        T(n+1,i)=unknow;
    end
end
for i=LEN3+1:LEN4
    if i>=LEN3+1&& i<=LEN4-1

unknow=lam(4)*(T(n,i+1)-2*T(n,i)+T(n,i-1))/dx(4)*dt/(dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,i);
        T(n+1,i)=unknow;
    elseif i==LEN4

unknow=(lam(4)*(T(n,LEN4-1)-T(n,LEN4))/dx(4)-h2*(T(n,LEN4)-Tin))*...
        dt/(0.5*dx(4)*rho(4)*c(4))+T(n,LEN4);
        T(n+1,i)=unknow;
    end
end

end
bb1=min(abs(T(:,end)-15));%最后一个温度最接近 15 的值
t1=find((T(:,end)==bb1+15));%温度在 15 度时的位置
t1_abs=t1/500;%换成绝对时间
y=min(abs(t1_abs-92));
end

nvars=1;
f=@ga_fit;
LB=1;
UB=10;
options=gaoptimset('PopulationSize',100,'PopInitRange',[LB;UB],'EliteCount',10,'Cross
overFraction',0.6,'Generations',100,'StallGenLimit',100,'TolFun',1e-100,'PlotFcns',{'@ga
plotbestf,@gaplotbestindiv}); % 算法参数设置
[x,fval]=ga(f,nvars,[],[],[],[],LB,UB,[],options)

```